

OSSERVATORIO



Friction Stir Welding nell'industria dei trasporti ferroviari

Friction Stir Welding in the rail transport industry

Dott. Ing. Chunlin DONG^(*)
Dott. Ing. Federica FOIADELLI^(**)
Dott. Ing. Michela LONGO^(**)

1. Introduzione

Il crescente interesse dell'industria meccanica e in particolar modo quello dei trasporti per avere materiali sempre più leggeri ma ugualmente resistenti, pone l'alluminio e le sue leghe in una posizione strategica. La leggerezza, combinata con una buona resistenza meccanica ed un'ottima resistenza alla corrosione, spiegano la presenza crescente nei vari settori, come quello automobilistico, aeronautico e ferroviario, di questo tipo di leghe [1, 2]. L'alluminio per le sue doti di leggerezza abbinata alla resistenza e alla robustezza, nonché alla facilità di lavorazione si sta affermando in maniera crescente nel settore ferroviario [3]. Questo settore ha dedicato una certa attenzione all'eco compatibilità dei materiali e alla riduzione al consumo energetico. La riduzione dei consumi energetici, l'utilizzo di materiali riciclabili e gli elevati standard di silenziosità fanno percepire la sensibilità per il rispetto dell'ambiente. Il risultato è una soluzione innovativa che permette una maggiore efficienza produttiva, garantendo standard qualitativi altamente superiori e all'avanguardia. Le esigenze produttive e l'alta qualità dei prodotti finiti spingono sempre più costruttori, imprese e coloro che svolgono ricerca a sviluppare nuove tecnologie e metodologie di produzione al fine di soddisfare le richieste e le crescenti aspettative dei cittadini e delle imprese. Per raggiungere questi standard, nonostante la sua recente introduzione nell'industria, la tecnologia di saldatura "Friction Stir Welding" (FSW) è sempre più spesso utilizzata in produzione.

2. Friction Stir Welding

La FSW è una tecnologia innovativa classificabile tra i processi di saldatura allo stato solido, sviluppata e brevettata nel 1991 dal The Welding Institute (TWI) di Cam-

1. Introduction

The increasing interest for the mechanical industry and in particular that of transport for the use to materials that are lighter but equally resistant, puts the aluminum and its alloys in a strategic position. The lightness, combined with good mechanical strength and excellent corrosion resistance, explain the growing presence in various sectors, such as automotive, aerospace and rail of this type alloy [1, 2]. The aluminum for its lightness combined with the resistance and robustness, and ease of processing is asserted increasingly in the railway industry [3]. This sector has devoted some attention to eco compatibility of materials and the reduction of energy consumption. The reduction of energy consumption, the use of recyclable materials and the high standards of silence make detect the sensitivity to the environment. The result is an innovative solution that allows a higher production efficiency, guaranteeing quality standards better and advanced. Production requirements and the high quality of the finished products are driving more and more manufacturers, enterprises and those engaged in research to develop new technologies and methods of production in order to meet the demands and growing expectations of citizens and businesses. In order to reach these standards, in spite of its recent introduction in the industry, the welding technology "Friction Stir Welding" (FSW) is increasingly being used in production.

2. Friction Stir Welding

The FSW is an innovative technology of solid-state welding, developed and patented in 1991 by The Welding Institute (TWI) of Cambridge [4]. In this process, a rotating tool is driven into the material and translated along

^(*) Department of R&D - China FSW Centre - Beijing FSW Technology Co.Ltd BAMTRI, AVIC.

^(**) Politecnico di Milano, Dipartimento di Energia.

^(*) Department of R&D - China FSW Centre - Beijing FSW Technology Co.Ltd BAMTRI, AVIC.

^(**) Politecnico di Milano, Department of Energy.

OSSERVATORIO

bridge [4]. Il processo consiste nell'inserimento di un utensile rotante nell'interfaccia tra due elementi da saldare (lamiere, tubi, etc.). Ad esso è impresso un moto rettilineo traslatorio (f [mm/min]) lungo la linea di giunzione e uno rotatorio (S [giri/min]) intorno al proprio asse. L'attrito riscalda il materiale che viene "estruso" intorno all'utensile e "forgiato" per effetto dell'elevata pressione prodotta dalla spalla dell'utensile stesso. Gli elementi fondamentali dell'utensile sono la "spalla" e il "pin". La spalla è l'elemento a contatto con la superficie superiore della saldatura, tale elemento ha due funzioni fondamentali: scalpare il materiale (per effetto dell'attrito dovuto alla rotazione e al conseguente strisciamento) e contenere il materiale sottostante (che altrimenti tenderebbe a fuoriuscire) mentre il pin è l'elemento che penetra tra i lembi da saldare e che ha la funzione di mescolare il materiale. La fig. 1 riporta il processo di saldatura e la geometria standard di un utensile.

Questo processo ha una certa applicazione soprattutto per la realizzazione di saldature ad alta resistenza su leghe di alluminio, quali ad esempio le serie 2XXX e 7XXX. Queste leghe sono generalmente classificate come "difficilmente saldabili" con tecnologie tradizionali a causa della "povera" solidificazione microstrutturale e della porosità nella zona di fusione del giunto stesso. Grazie alle sue innumerevoli proprietà, quali ottima finitura superficiale, attenzione all'ambiente, elevata efficienza energetica, lavorazione ripetibile e monitorabile, la FSW viene oggi utilizzata per saldare anche altre tipologie di alluminio quali ad esempio la serie 5XXX o la più comune serie 6XXX. Nonostante i numerosi vantaggi che questa tecnologia offre, non ci si deve però dimenticare dei piccoli inconvenienti che può presentare: velocità di saldatura discretamente più bassa rispetto a metodologie di saldatura tradizionali o per fusione, necessità di mantenere rigidamente a contatto i lembi da saldare, Keyhole alla fine di ogni saldatura, ovvero un 'difetto' legato al disimpegno dell'utensile dal materiale.

Numerosi studi hanno evidenziato come i giunti saldati mediante FSW abbiano eccellenti caratteristiche di resistenza a fatica, trazione, piegatura, nonché elevati valori di durezza, caratteristiche che in alcuni casi si presentano migliori anche rispetto a giunti ottenuti con altri processi di saldatura più convenzionali. Per tutte queste ragioni, questa tecnica ha potenzialmente un numero di applicazioni significativo in qualsiasi tipo di industria, da quella automobilistica, aerospaziale, navale e per finire non meno di importanza quella ferroviaria [5]. Molteplici studi condotti sulla saldatura FSW di leghe di alluminio mostrano come i parametri di processo possano condizionare le caratteristiche della giunzione [6-8]. In particolare sono stati effettua-

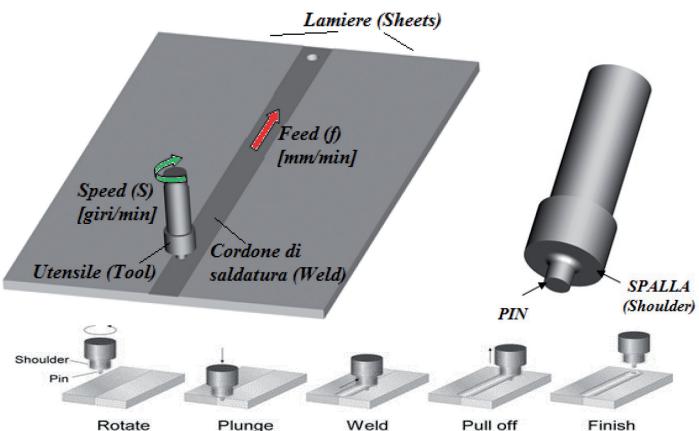


Fig. 1 - Processo Friction Stir Welding e utensile impiegato.
Fig. 1 - Friction Stir Welding and tool utilized during the process.

the interface of two or more plates. Friction heats the material which is extruded around the tool and forged by the large pressure produced by the tool shoulder. In this technology, there are two fundamental parameters, respectively: Feed (f [mm / min]) and Speed (S [rpm]), around its axis. The basic elements of the tool are the "shoulder" and the "pin". The shoulder is the element in contact with the upper surface of the weld. This element has two basic functions: heat the material (due to friction due to the rotation and the consequent sliding) and contain the underlying material (which otherwise would tend to leak) while the pin is the element, which pierces between the edges to weld, and which has the function to mix the material. Fig. 1 shows the process of welding and the standard geometry of a tool.

This process has a certain application, especially for the realization of high resistance welding of aluminum alloys, such as for example the series 2XXX and 7XXX. These alloys are generally classified as "difficult to weld" with traditional technologies due to the "poor" solidification microstructure and porosity in the casting area of the same joint. Today, thanks to its numerous properties, the FSW is used for welding other types of aluminum such as the 5XXX series or the most common 6XXX series. Although, this technology has many advantages, we should not forget. However, some problems that may arise during the weld, for example speed discretely lower than traditional welding methods or to the merger, the need to keep rigidly in contact the edges to be welded, Keyhole at the end of each weld, or a 'defect' linked for the exit of the tool from the material.

Numerous studies have shown that the welded joints by FSW have excellent characteristics of resistance to fatigue, tensile, bending, as well as high hardness values, characteristics that present themselves in some cases even better

OSSERVATORIO

ti diversi studi per valutare gli effetti della velocità di rotazione ed avanzamento, della geometria e dell'inclinazione dell'asse dell'utensile sulla qualità della giunzione (in termini di limite di resistenza a trazione, microstruttura del giunto, durezza, resistenza a fatica, etc.) [9÷11].

L'articolo ha come scopo quello di mettere in luce l'integrazione di questa tecnologia nel mondo dell'industria ferroviaria illustrando i risultati di una campagna sperimentale finalizzata alla valutazione delle proprietà meccaniche delle saldature tramite saldatura FSW di alluminio AA6060-T6. Le diverse saldature sono state eseguite variando due parametri di processo (velocità di rotazione e avanzamento) e utilizzando un utensile standard.

3. Alluminio e l'integrazione della FSW nel settore ferroviario

Le componenti in alluminio sono sempre più utilizzate nel settore ferroviario, in quanto migliorano la sicurezza ad un costo vantaggioso e con un minimo aumento di peso. I treni sfruttano diverse tecnologie ecologiche al fine di rispettare l'ambiente. Ad esempio, l'energia di frenata che viene recuperata e riconvogliata nella rete elettrica del treno, contribuendo a ridurre i consumi energetici di circa il 40% rispetto ai treni precedenti [12]; oppure il calore generato da trasformatori e convertitori viene sfruttato per riscaldare il treno, con notevoli vantaggi ambientali ed economici. L'idea di utilizzare delle metodologie per salvaguardare l'ambiente porta l'attenzione a spostarsi sui processi. Proprio su questo aspetto la FSW è una tecnica che rispetta l'ambiente in quanto a differenza delle saldature tradizionali non apporta materiale aggiuntivo e non necessita di gas.

La FSW è utilizzata nella produzione di carrozze ferroviarie. Questo approccio progettuale può migliorare la resistenza agli urti di veicoli per l'assenza di saldature trasversali e l'elevata resistenza all'instabilità dei pannelli sotto compressione longitudinale. In China, le parti dei treni sono saldati mediante questa tecnica proprio grazie alle sue diverse qualità.

L'obiettivo è quello di produrre treni ad alta velocità realizzati mediante estrusi uniti a mezzo della FSW. A questo scopo non è possibile non sottolineare l'attenzione prestata dalla Hitachi a questo processo permettendone l'impiego per pannelli double skin side, in sostituzione dell'ormai consolidato processo MIG. I motivi di tale scelta derivano dalla minore distorsione mostrata dai giunti e dalle migliori caratteristiche meccaniche degli stessi.

Oggi la Hitachi ha creato un nuovo concetto di treno, basato sulla giunzione dei pannelli costituenti la struttura esterna in alluminio usando la FSW, impiegando barre cave estruse per ridurre il numero di parti della struttura ed adattato al pubblico, poco costoso, energeticamente efficiente, a bassa manutenzione. Altre applicazioni includono: binari, sottopassaggi e tram, questi ultimi già in uso in Giappone; serbatoi e vagoni; strutture esterne.

than joints obtained with other more conventional welding processes. For all these reasons, this technique potentially has a number of significant applications in any type of industry from that the automotive, aerospace, naval and to finish railway sector [5]. Different studies conducted on the FSW welding of aluminum alloys show how the process parameters influence the characteristics of the junction [6÷8]. In particular, several studies have been performed to evaluate the effects of the rotation speed and of the feed, the geometry and the inclination of the axis of the tool on the quality of the junction (in terms of limit of the tensile strength, microstructure of the joint, toughness, fatigue resistance, etc.) [9÷11].

This work aims to highlight the integration of this technology in the world of the rail industry by presenting the results of an experimental campaign aimed at the evaluation of the mechanical properties of the welds by welding FSW of AA6060-T6 aluminum. The different welds are carried out by varying the process parameters (rotational speed and feed rate) and using a standard tool.

3. Aluminum and integration of the FSW in the railway sector

The aluminum components is used increasingly in the railway sector, as they improve security at an advantageous cost and with a minimal increase in weight. Trains exploit different ecological technologies. For example, the braking energy is recovered and feedback into the power grid of the train, helping to reduce energy consumption by about 40% compared to the previous trains [12], or the heat generated by transformers and converters is used to heat the train, with significant environmental and economic benefits. The idea to use of the methodologies to protect the environment leads to move the focus on processes. On this aspect, the FSW is a technique that respects the environment because unlike the traditional welding does not provide additional material and do not need gas.

The FSW is used in the production of railway carriage. This design approach can improve the impact resistance of vehicles to the absence of transverse seals and high buckling strength of the panels under longitudinal compression. In China, the parts are welded by train this technique thanks to its different qualities.

The objective is to produce high-speed trains made using extruded united with FSW. To do this, you cannot fail to underline the attention paid by Hitachi in this process allowing the use of double skin side panels, replacing the typically MIG process. The reasons for this substitution is that with use of the FSW there is minor distortion shown by the joints and best mechanical characteristics of the same.

Today, Hitachi has created a new concept of the train, based on the junction of the panels forming the outer structure in aluminum using the FSW, employing hollow bars extruded to reduce the number of parts of the structure and adapted to the public, inexpensive, energy-efficient, to low

OSSERVATORIO



Fig. 2 - La FSW nel progetto giapponese A-Train.
Fig. 2 - The FSW in the A-Train Project.

In Giappone, la FSW viene molto utilizzata in campo ferroviario. Aziende come la Hitachi e la Sumitomo Light Metals l'hanno introdotta per la realizzazione dei loro ultimi prodotti, in particolare nel progetto A-Train (fig. 2), che prevede la realizzazione della struttura del treno partendo da profilati in alluminio.

Anche in Europa si comincia a pensare di utilizzare, per la costruzione di treni, materiali leggeri in combinazione con la nuova tecnologia di saldatura. La ditta Alstom utilizza panelli di alluminio saldati mediante Friction Stir Welding.

Questa tecnologia, ha il vantaggio di ridurre sensibilmente i costi delle lavorazioni successive e di produrre mezzi molto leggeri, tanto che la sola cassa in estrusi può essere anche di qualche tonnellata più leggera di un'equivalente in acciaio. Inoltre, è possibile ottenere una precisione sulle tolleranze ben più elevata (anche di un ordine di grandezza), e una finitura superficiale migliore, con l'eliminazione degli antiestetici "bozzi" tipici dell'assestamento delle lamiere. Una struttura monoscocca (fig. 3) è generalmente usata per veicoli ferroviari e trova molti componenti che richiedono di essere saldati.

Come in precedenza accennato il FSW, in quanto processo allo stato solido, non presenta i tipici difetti dei tradizionali processi per fusione quali inclusioni, vuoti e porosità.

Proprio per questo aspetto la FSW può essere integrata per saldare diversi parti, per esempio pannelli laterali, pannelli superiori o addirittura l'intera struttura del treno. Infatti, le geometrie dei giunti realizzabili mediante l'ausilio di questa tecnologia possono essere di diversi tipi (fig. 4). Le lettere 'a' e 'b' indicano giunti saldati testa a testa; le lettere 'c' e 'd' indicano giunti a sovrapposizione; le restanti lettere indicano giunti d'angolo. Queste differenti giunzioni dimostrano ulteriormente l'elevata versatilità della

maintenance. Other applications include rails, subways and trams, the latter already in use in Japan; tanks and wagons; external structures.

In Japan, the FSW is extensively used in the railway



Fig. 3 - Esempio della struttura di una cassa ferroviaria in alluminio e saldata mediante FSW.
Fig. 3 - Example body structures of the carriage railway in aluminum and welded with FSW.

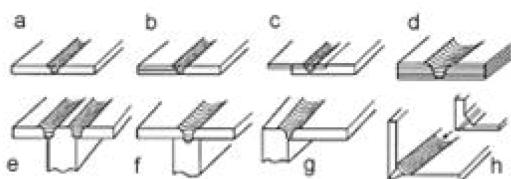


Fig. 4 - Differenti tipi di saldatura.
Fig. 4 - Different types of the weld.

OSSERVATORIO

Friction Stir Welding. In particolare la lettera 'a' indica la tipologia di giunto che costituirà l'obiettivo di questo lavoro: le due lamiere da saldare vengono disposte su un piano di lavoro e fissate adeguatamente, in modo che i due lati da saldare non si separino durante il processo a causa delle forze in gioco, e l'utensile penetra in corrispondenza della linea di giunzione. Si può osservare che si tratta di geometrie comunemente adottate e non risulta quindi necessaria alcuna modifica progettuale se si desidera sostituire una giunzione realizzata mediante procedimento tradizionale con una FSW. La FSW permette di ottenere giunzioni di ottima qualità ed efficienza, caratterizzate da basse tensioni interne e deformazioni, mantenendo comunque molto elevata la produttività, in quanto consente di saldare pezzi di spessore elevato (40-50mm con una so-la passata) in passata singola. A questi pregi si può aggiungere la possibilità di saldare leghe leggere tradizionalmente non saldabili e materiali omologhi o dissimili nella composizione chimica e nello stato di fornitura.

4. Giunti di testa

Al fine di studiare una possibile applicabilità della FSW nel settore ferroviario, è stata condotta una campagna sperimentale mediante saldature di testa. Per compiere questa attività è stato necessario utilizzare una macchina utensile CNC. Le saldature, oggetto del presente studio, sono state eseguite su lamiere di alluminio AA6060-T6 di spessore 5 mm, utilizzando un utensile standard il quale ha il diametro della spalla pari a 15 mm e il diametro del pin rispettivamente pari a 5 mm.

La fig. 5 mostra la geometria dell'utensile impiegato nella campagna sperimentale e di alcuni dettagli durante il processo di saldatura.

field. Companies like Hitachi and Sumitomo Light Metals have introduced for the realization of their latest products, particularly in the A-Train project (fig. 2), which involves the construction of the structure of the train starting from aluminum sections.

Also in Europe begins to think of using, for the construction of trains, lightweight materials in combination with the new welding technology. The company Alstom uses aluminum panels welded by Friction Stir Welding.

This technology has the advantage of significantly reducing the costs of the subsequent processes and to produce means very light, so that the alone carriage in extrusion can also be of a few tons lighter than equivalent steel. Moreover, it is possible to obtain a much higher precision on tolerances (even of one order of magnitude), and a better surface finish, with the elimination of unsightly "bumps" typical of the adaptation of the sheets. Generally, a mono-frame structure (fig. 3) is used for rail vehicles and it finds many components that need to be welded. As previously mentioned the FSW, as a process in the solid state, does not present the typical defects of the traditional processes for fusion such as inclusions, voids and porosity.

Precisely for this aspect, the FSW is integrated to weld different parts, for example side panels, the upper panel or even the entire structure of the train. In effect, the geometries of the joints achievable are of different types (fig. 4). The letters 'a' and 'b' show butt welded joints and the letters 'c' and 'd' indicate lap joints, the remaining letters indicate corner joints. These different junctions further demonstrate the high versatility of the Friction Stir Welding. In particular, the letter 'a' indicates the type of coupling that will be the goal of this work. In this case, the two sheets are arranged on a working plane and they fixed adequately. The

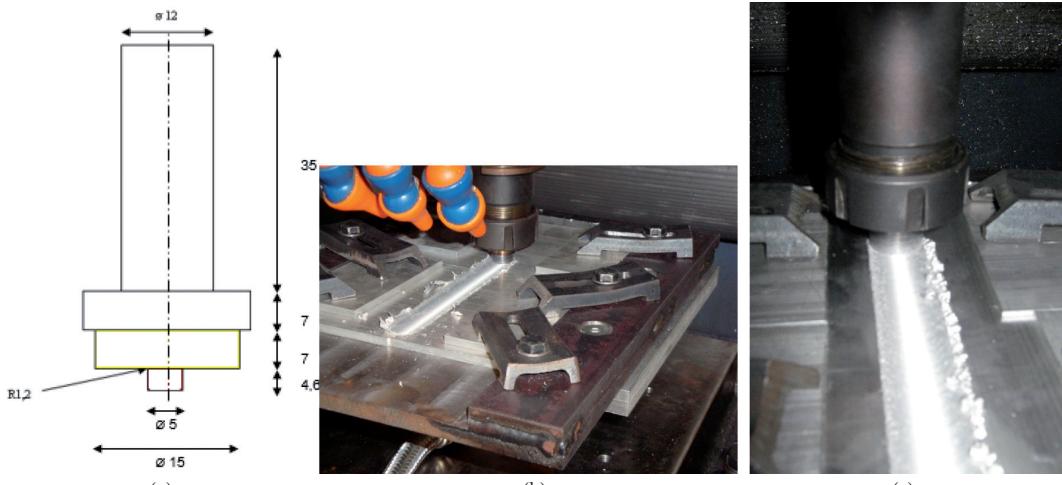


Fig. 5 - (a) Dettagli dell'utensile; (b) processo d'insieme della FSW; (c) cordone di saldatura quasi alla fine del processo.
Fig. 5 - (a) Dimension of the tool; (b) the entry of the pin inside the two sheets; (c) the weld in the final part of the process.

OSSERVATORIO

Sono stati effettuati numerosi test variando sia la velocità di rotazione, sia la velocità di avanzamento dell'utensile. Tutte le condizioni di saldatura sono riassunte nella tabella 1. In tutti i casi l'inclinazione dell'asse dell'utensile è pari a $2,5^\circ$ e tutte le saldature sono state eseguite con una cella di carico al fine di misurare le forze in gioco durante la saldatura.

5. Risultati e discussione

Terminato il piano sperimentale secondo differenti parametri di saldatura (tabella 1), l'attenzione si è concentrata sul valutare la qualità delle giunzioni ottenute. Per fare questo si sono effettuate una serie di prove differenti, rispettivamente:

- misura della forza: informazione ottenuta durante il processo in quanto attraverso una cella di carico posta sotto il piano inclinato permette di monitorare l'andamento della stessa per tutta la durata della saldatura (fig. 6a);
- prove di trazione [13]: mediante l'ausilio di una macchina elettromeccanica si sono effettuate le seguenti prove su provini ricavati direttamente dalla due lame saldate lungo la direzione di saldatura (fig. 6b);
- prove di microdurezza [14] e analisi di tipo micro/macroscopico: estrazione di un provino dalla lamiera saldata e inglobato in una resina al fine di effettuare mediante uso del microdurometro prove di durezza (fig. 6c) e mediante uso di microscopio per analisi metallografiche.

a) Misura sulle forze

Le forze di saldatura, misurate durante il processo grazie all'impiego di una cella di carico posizionata sotto il piano di saldatura, sono state analizzate in funzione dei parametri di processo. In generale, la forza principale che si considera è la forza Z in quanto si tratta della componente principale. In fig. 7 si riporta un esempio di forze al variare della velocità di rotazione mantenendo fisso il parametro di avanzamento.

TABELLA 1 – TABLE 1
DETTAGLIO DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE
DETAILS OF THE EXPERIMENTAL CAMPAIGN

Speed (S) [giri/min] Speed (S) [rpm]	Feed (f) [mm/min]
1000	150, 300, 600
1500	150, 300, 600
2000	150, 300, 600

two sides cannot separate during the process due to the forces in play, and the tool penetrates in correspondence of the junction. It can be noted that it is commonly adopted geometries and does not therefore require any design change if you want to replace a junction made by the traditional process with a FSW. The FSW joints allow obtaining high quality and efficiency, characterized by low internal tensions and deformations, while still maintaining very high productivity, as it allows welding pieces of high thickness (40-50 mm) in a single sweep. In addition to these qualities, it can add the ability to weld light alloys traditionally non-weldable materials and counterparts or dissimilar in chemical composition and in the delivery state.

4. Butt Joint

In order to study a possible applicability of FSW in the railway sector, an experimental campaign is been conducted by means of butt welds. To carry out this activity it is necessary to use a CNC machine tool. The welds, object of the present study, are performed on sheets of aluminum AA6060-T6. The thickness is equal to 5 mm. In this experimental is been used a standard tool which has the shoulder diameter equal to 15 mm and the diameter of the pin respectively equal to 5 mm.

Fig. 5 shows the details during the welding process, respectively the entry of the pin inside the two sheets and the weld in the final part of the process.

Numerous tests are been performed by varying both the speed of rotation, both the speed of the tool. All the welding

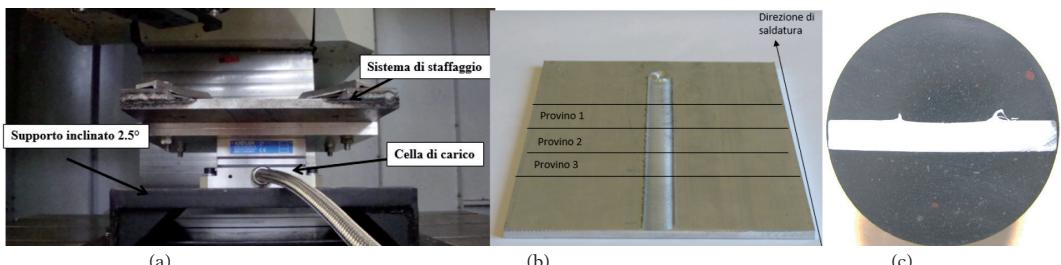


Fig. 6 - (a) Set-up sperimentale per misurare le forze; (b) provini per le prove di trazione; (c) provino metallogрафico per le prove di durezza e metallurgiche.

Fig. 6 - (a) Experimental set-up for measurement force; (b) specimen for tensile test; (c) specimen for metallographic test.

OSSERVATORIO

La fig. 7 si riferisce all'intero processo di saldatura. Considerando la fig. 1 si può vedere come nel momento in cui il pin dell'utensile va in contatto con le lamiere, le forze salgono bruscamente fino a quando la spalla non va a contatto (fase di *Plunge*). Da questo momento inizia la fase vera e propria di saldatura (*Weld*) costituita da una fase iniziale di assestamento del processo e una seconda fase in cui si stabilizza. Infine la fase di *Pull Off* determina la caduta delle forze in quanto l'utensile è nella fase di risalita in quanto terminato il processo.

La forma della curva relativa alla forza F_z presenta la caratteristica conformatore a vasca da bagno, rappresentativa di un primo transitorio iniziale. Le curve hanno uno sviluppo che si estende prima dell'origine dell'asse x per un certo tratto che rappresenta il transitorio iniziale; ovvero l'utensile per questo tratto della curva è caratterizzato dal solo moto di rotazione entro le piastre. La curva poi si estende oltre l'origine dell'asse x , in corrispondenza dei punti in cui il moto diventa oltre che rotatorio anche traslatorio;

Per ogni saldatura è stata identificata una forza media corrispondente, al fine di effettuare un confronto tra le condizioni di prova. I valori medi sono stati calcolati nella seconda metà del percorso dell'utensile, dove il processo ha raggiunto lo stato stazionario. Quello che si può osservare dalla fig. 8 è che al crescere della velocità di avanzamento f , aumenta l'entità delle forze in gioco. Ad esempio mantenendo fisso il parametro S1000 e aumentando la velocità di avanzamento F150, F300, F600 si può notare un aumento delle forze F_z da 4500 N circa, per poi passare a 5000 N ed infine 5500 N.

b) Prove di trazione

Le proprietà meccaniche dei giunti sono state valutate mediante delle prove di trazione eseguite in direzione ortogonale alla direzione di saldatura. I test sono stati eseguiti su provini a sezione rettangolare di larghezza pari a 25 mm (sezione di circa 125 mm²) ricavati dalle varie lamiere saldate. Da ciascuna piastra saldata sono stati ricavati tre campioni al fine di valutare quale giunzione è migliore. Il vero sforzo massimo viene rilevato in corrispondenza della velocità di rotazione maggiore S2000 ed in corrispondenza della velocità di avanzamento

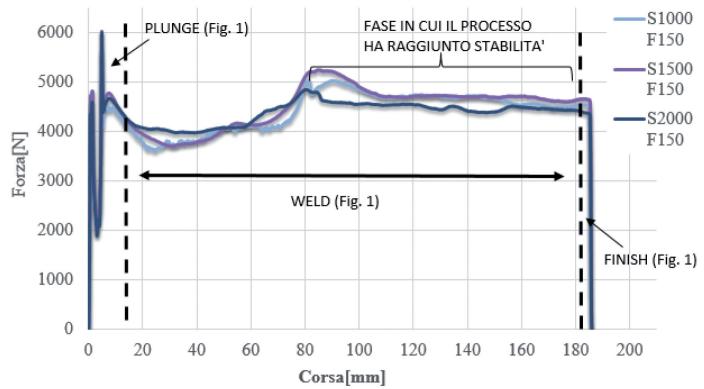


Fig. 7 - Rappresentazione delle forze di saldatura per l'asse Z.
Fig. 7 - Representation of the forces of the weld for axial Z.

conditions are summarized in table 1. In all cases, the inclination of the tool axis is equal to 2.5 ° and all welds are performed with a load cell in order to measure the forces in play during welding

5. Results and discussion

After the experimental plane with different welding parameters (see Table 1), the attention is focused on evaluating the quality of joints obtained. To do this, it is necessary to make a series of different tests, respectively:

- measurement of forces: information obtained during the process and through a load cell placed under the inclined plane allows to monitor the trend of the same for the duration of the welding (fig. 6a);
- tensile tests [13] with the aid of an electromechanical

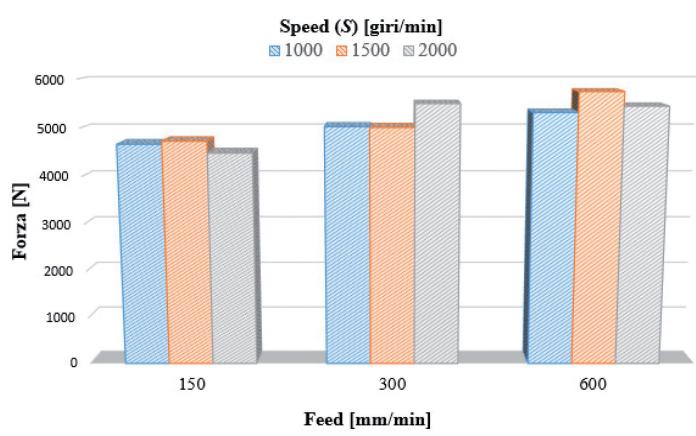


Fig. 8 - Forza Z [N] per tutte le condizioni di saldatura.
Fig. 8 - Force Z [N] for all conditions of the weld.

OSSERVATORIO

più bassa F150. In fig. 9 si mostrano i diversi valori di UTS per tutte le condizioni di saldatura. Considerando che il materiale di base ha mostrato un UTS (Ultimate Tensile Strength) di 215 MPa possiamo dire che la saldature hanno risultati soddisfacenti in termini di resistenza alla trazione. E' importante sottolineare che tutti i campioni sono stati estratti dall'ultima parte delle piastre saldate, dove si presume che il processo abbia raggiunto delle condizioni stazionarie. Per quanto riguarda le saldature eseguite con F150 ed F300 si può dire che l'andamento della deformazione dei provini sia del tutto simile, ma nel caso di F300 l'entità della deformazione è inferiore rispetto al caso di F150. Invece l'andamento della deformazione, per le saldature eseguite con F600, è differente rispetto a quelle eseguite con F150 ed F300, ed addirittura non è possibile individuarne un andamento ben preciso e di univoca interpretazione.

c) Analisi metallografiche

Per valutare l'influenza dei parametri di processo, sulla struttura del materiale e sull'incrudoimento del giunto, sono state effettuate sulla sezione saldata prove di microdurezza di tutte le condizioni indicate in Tabella 1.

Da ciascuna piastra saldata è stato ricavato un campione, ottenuto tagliando lungo la direzione perpendicolare al percorso di saldatura. Sono state eseguite prove di microdurezza con un carico di 5 N e un tempo di permanenza pari a 15 secondi. Infine, è stato eseguito un esame metallografico allo scopo di analizzare la microstruttura della sezione trasversale dei giunti in funzione dei parametri di processo e di valutare la granulometria nelle varie regioni della zona saldata.

L'intensa deformazione plastica a cui è sottoposto il materiale, oltre all'esposizione ad alta temperatura all'interno della zona di mescolamento porta come risultato ad una ricristallizzazione del materiale, con conseguente

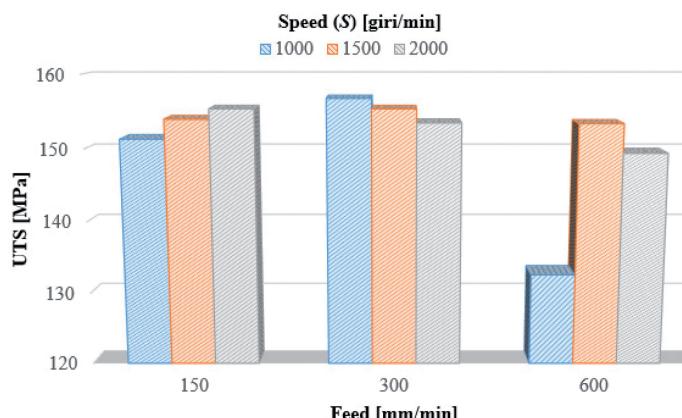


Fig. 9 - UTS [MPa] per tutte le condizioni di saldatura.
Fig. 9 - UTS [MPa] for all conditions of the weld.

machine were carried out the following tests on specimens taken directly from the two plates welded along the welding direction (fig. 6b);

- testing of microhardness [14] and Analysis of type micro / macroscopic: extraction of a specimen from welded sheets and embedded in a resin in order to perform through use of micro durometer of the hardness tests (fig. 6c) and by the use of a microscope to do analysis metallographic.

a) Measure of the force

The forces of welding, measured during the process with the use of a load cell positioned below the welding plane, they are analyzed as a function of process parameters. In general, it is considered that the main force is the force in Z as it is the main component. Fig. 7 shows an example of forces to varying the speed of rotation and keeping fixed parameter of advancement.

Fig. 7 refers to the entire welding process. In fig. 1, it can possible to observe how in the moment that the pin of the tool go in contact with the sheet, the forces increase quickly until the shoulder that it must be in contact (phase PLUNGE). From this point begins the phase real welding (WELD) consists of an initial phase of adjustment of the process and a second phase in which it stabilizes. Finally, the step of PULL OFF determines the fall of the forces as the tool and in the ascent phase since the process is finished.

The form of curve relative to the force F_z has the characteristic of the 'shape of a bathtub' and it is representative of a first initial transient. The curves have a development that extends before the origin of the x-axis for a certain distance that represents the initial transient, i.e. the tool for this part of the curve is characterized by only rotational motion within the plates. The curve then extends beyond the origin of the x-axis, in correspondence of the points in which the motion becomes also with advanced. For each weld is been identified a force corresponding average, in order to make a comparison between the test conditions. The average values are calculated in the second half of the tool path, where the process has reached steady state. What can be seen from fig. 8 is that the increase of the feed rate f , increases the magnitude of the forces in play. For example, maintaining a fixed parameter $S1000$ and increasing the speed of $F150$, $F300$, $F600$ you may notice an increase in the forces F_z 4500 N, then moved to 5000 N and 5500 N.

b) Tensile tests

The mechanical properties of the joints are evaluated by means of the tensile tests performed in the direction orthogonal to the direction of welding. The tests were performed on specimens of a rectangular section of width equal to 25

OSSERVATORIO

sviluppo di zone aventi strutture differenti da quelle del materiale base. Basandosi sulla caratterizzazione microstrutturale dei grani e dei precipitati, come per le saldature convenzionali, si possono identificare quattro zone distinte:

- materiale base, avente struttura inalterata (BM);
- zona termicamente alterata (HAZ);
- zona termo-mecanicamente alterata (TMAZ);
- cordone di saldatura (Nugget zone, zona in cui c'è stato il mescolamento del materiale).

La prima zona, quella più distante dalla saldatura, non è coinvolta direttamente dal processo, la microstruttura e le caratteristiche meccaniche non sono quindi soggette a modifica (BM). La seconda zona, più vicina al cordone di saldatura rispetto alla precedente, è composta da metallo base che ha subito un ciclo termico senza però subire deformazioni meccaniche. In questa regione si ha comunque una modifica della microstruttura e/o delle caratteristiche meccaniche (HAZ).

La terza zona è quella in cui il materiale è stato deformato plasticamente dall'utensile e il calore rilasciato dal processo ha provocato le modificazioni più significative nel materiale (TMAZ). Nella quarta zona, quella centrale, si trova l'area ricristallizzata della zona termomeccanicamente alterata. Questa zona (Nugget zone) presenta spesse volte una forte asimmetria rispetto al centro del cordone, conseguenza delle differenti sollecitazioni a cui sono sottoposte le zone a ridosso della saldatura (dovuto al moto dell'utensile).

• Prove di microdurezza

Una distribuzione tipica di microdurezza ottenute sulla sezione del giunto è riportata in fig. 10.

Su ciascun provino è stata realizzata una griglia di

mm (sezione di circa 125 mm^2) ottenuta dalle varie foglie saldate. Da ogni foglio, tre campioni saldati sono ottenuti per valutare quale condizione sia migliore. Il valore massimo di sforzo è individuato in corrispondenza della velocità rotazionale superiore S2000 e in corrispondenza della velocità anteriore minima F150. I valori di UTS per tutte le condizioni sono indicati in fig. 9. Mentre il materiale base mostrava un UTS di 215 MPa, si può dire che i saldati hanno risultati soddisfacenti in termini di resistenza. È importante notare che tutti i campioni sono estratti dalla parte finale delle piazzette saldate, dove si assume che il processo sia giunto alle condizioni di stato stabile. Riguardo ai saldati eseguiti con F150 e F300, si può dire che la tendenza della deformazione delle specie è molto simile, ma nel caso di F300 la quantità di deformazione è minore rispetto a F150. Invece, la tendenza della deformazione dei saldati eseguiti con F600 è diversa da quelli eseguiti con F150 e F300, e addirittura non è possibile identificare una tendenza e una interpretazione univoca.

c) Metallographic analysis

To evaluate the influence of process parameters, on both the structure of the material that the hardening of the joint, are made on the welded section of the microhardness tests on all the conditions indicated in table 1.

From each welded plate is obtained a sample, obtained by cutting along the direction perpendicular to the weld path. Microhardness tests were performed with a load of 5 N and a residence time equal to 15 seconds. Finally, metallographic examination is been performed in order to analyze the microstructure of the cross section of the joints as a function of process parameters and to assess the grain size in the various regions of the welded area.

The intense plastic deformation to which the material is subjected, in addition to exposure to high temperature inside of the mixing zone as a result leads to a recrystallization of the material, with consequent development of areas having different structures from those of the base material. Based on the microstructural characterization of grains and precipitates, as for conventional welds, one can identify four distinct areas:

- material, whose structure is unchanged (BM);
- heat Affected Zone (HAZ);
- thermo-Mechanically Affected Zone (TMAZ);
- weld (Nugget zone, an area where there is the mixing of the material).

The first zone, the one farthest from the welding, it is not directly involved in the process, the microstructure and the mechanical properties are therefore not subject to modification (BM). The sec-

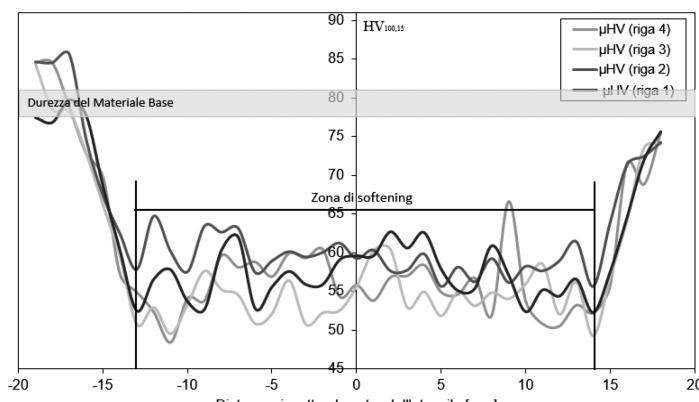


Fig. 10 - Andamento della microdurezza per le condizioni S2000 giri/min e F150 mm/min.
Fig. 10 - Characteristics of the microhardness for the weld with S2000 rpm e F150 mm/min.

OSSERVATORIO

microdorezze, prestando attenzione ad eseguire le stesse prove mantenendo una distanza di 1mm dal bordo inferiore e laterale ed una distanza relativa tra impronte successive di 1 mm. Come si può osservare dalla fig. 10, la durezza della regione saldata è significativamente inferiore a quella del materiale di base (78 ± 3 mHV). L'alta temperatura raggiunta durante il processo di saldatura può essere considerata come la causa principale della diminuzione della durezza del materiale. La larghezza della "regione di softening" ossia la regione ammorbidente e i valori di microdorezza rilevati in altre regioni variano in funzione dei parametri di processo. L'ampiezza della zona di "softening" dipende dal contributo dovuto ai parametri di saldatura termica e, conseguentemente, dall'energia termica trasmessa al pezzo e dal momento in cui il calore si propaga all'interno del materiale.

La dimensione di questa zona è molto legata ai parametri di processo. Ad esempio nel caso di una saldatura con S1000 giri/min and f150 mm/ min la zona di softening ha un'estensione di oltre 25 mm, estensione che si riduce radicalmente nel caso dei provini realizzati con velocità di saldatura più elevata (600 mm/min), in questi casi la zona fortemente alterata si riduce a circa 15 mm. Questa dimensione (15 mm) è infatti il diametro caratteristico della spalla dell'utensile utilizzato per la realizzazione di tutte le saldature. Allontanandosi dalla zona centrale del cordone, ove cioè l'alterazione è molto forte ($49.2 \div 57.5$ mHV), il materiale tende a riportarsi alla durezza del materiale di base (78 ± 3 mHV). Nella maggior parte dei casi, come visibile in fig. 10 si ha una durezza media superiore nella zona a diretto contatto con la spalla dell'utensile a causa dall'elevata deformazione plastica introdotta e al maggior tempo di esposizione del materiale alla temperatura sviluppata.

- *Analisi della microstruttura*

Durante la saldatura FSW, il materiale subisce un'intensa deformazione plastica ad elevate temperature, che inducono la generazione di grani ricristallizzati con una struttura differente [15] e un incremento di temperatura attorno e all'interno della zona di mescolamento. Dall'analisi microstrutturale del materiale saldato si possono individuare quattro zone distinte in prossimità di una giunzione: materiale base (MB), si tratta della parte lontana dalla zona di saldatura. In questa zona il materiale può subire un debole ciclo termico legato alla conduzione del calore che proviene dal centro del giunto, senza però mostrare alterazioni della microstruttura o delle proprietà meccaniche; zona termicamente alterata (HAZ) è quella la parte della saldatura più esterna nella quale il ciclo termico di saldatura ha causato l'alterazione della microstruttura e delle proprietà meccaniche del materiale; zona termo-mecanicamente alterata (TMAZ) è la zona in cui il materiale ha subito sia deformazione plastica sia riscaldamento con conseguente ricristallizzazione; ed infine la zona centrale (NUGGET) caratterizzata da una

ond zone, closer to the weld bead with respect to the previous one, is composed of the base metal which has undergone a thermal cycle without however undergo mechanical deformations. In this region, there is still a modification of the microstructure and/or the mechanical characteristics (HAZ).

The third zone is that in which the tool has plastically deformed the material and the heat released from the process has resulted in the most significant changes in the material (TMAZ). In the fourth area, the central area is the recrystallized zone thermo-mechanically altered. This area (Nugget zones) has often a strong asymmetry with respect to the center of the cordon, a consequence of the different stresses to which are subject the zones close to the weld (due to the motion of the tool).

- Microhardness

A typical distribution of microhardness obtained on the section of the joint is shown in fig. 10.

On each specimen is been made a grid of microhardness, taking care to perform the same while maintaining a distance of 1mm from the bottom edge and side and a relative distance between successive imprints of 1 mm. As can be seen from fig. 10, the hardness of the welded region is significantly lower than that of the base material (78 ± 3 mHV). The high temperature reached during the welding process can be considered as the main cause of the decrease of the hardness of the material. The width of the "region of softening" and the microhardness values detected in other regions vary in function of the process parameters. The amplitude of the area of "softening" dependent on the contribution due to thermal welding parameters and, consequently, by the thermal energy transmitted to the workpiece and from the moment in which the heat propagates inside the material.

The dimension of this area is linked to the process parameters. For example, in the case of a welding with S1000 rpm and f150 mm / min, the softening zone has an extension of more than 25 mm, an extension which is reduced dramatically in the case of the specimens made with higher welding speed (600 mm/min), in these cases, the strongly altered zone is reduced to about 15 mm. This dimension (15 mm) is in fact the characteristic diameter of the shoulder of the tool used for the realization of all welds. Moving away from the central area of the cord, that is, where the alteration is very strong ($49.2 \div 57.5$ mHV), the material tends to return to the hardness of the base material (78 ± 3 mHV). In most cases, as shown in fig. 10 it has a higher average hardness in the area in direct contact with the shoulder of the tool due to the high plastic deformation introduced and the greater time of exposure of the material to the temperature developed.

- Macro and micro structure

During FSW, the material is subjected to intense plastic deformation at high temperatures, which induce the generation of recrystallized grains with a different structure [15] and an increase in temperature in the mixing zone. Microstructural analysis of the welded material can identify four distinct zones in a junction:

- the base material (MB), this is the part away from the welding area. In this area the material may undergo a

OSSERVATORIO

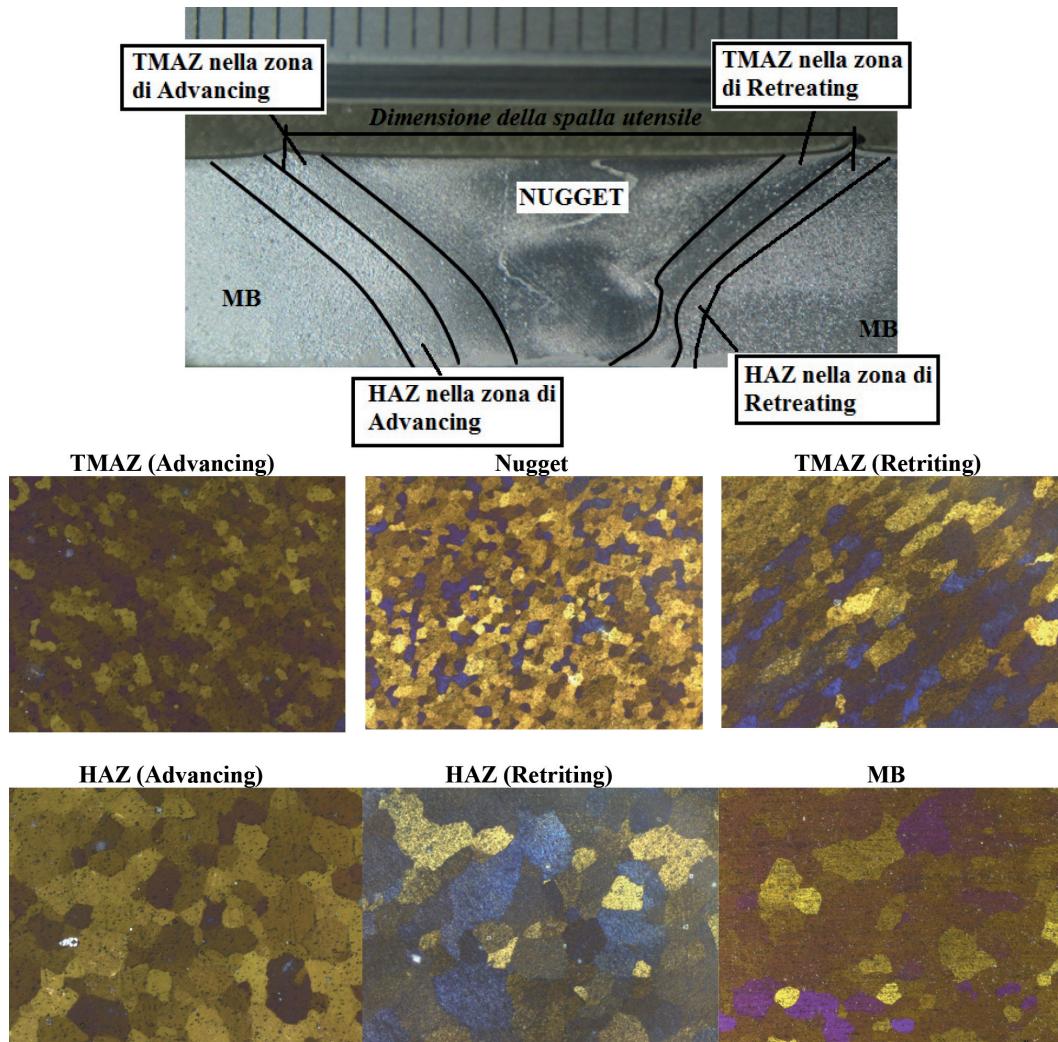


Fig. 11 - Analisi macroscopica e microscopica.
Fig. 11 - Macro and Micro analysis.

microstruttura molto fine e uniforme, con caratteristiche meccaniche superiori rispetto a quelle delle altre zone del giunto e sicuramente molto superiori alle caratteristiche meccaniche dei giunti ottenuti per fusione. La fig. 11 mostra il giunto con le rispettive zone.

Dalle microografie effettuate su ciascun provino si osserva come un aumento del numero di giri dell'utensile e un aumento della velocità di avanzamento determinino un rimescolamento più intenso del materiale, con conseguenti linee indicative del flusso del materiale sempre più

weak thermal cycle related to the conduction of heat that comes from the center of the joint, without showing alterations of the microstructure or mechanical properties;

- *heat affected zone (HAZ) is that the most external part of the weld in which the thermal cycle of welding has caused the alteration of the microstructure and mechanical properties of the material;*
- *thermo-mechanically affected zone (TMAZ) is the area in which the material has undergone both plastic deformation with heating resulting in recrystallization,*

OSSERVATORIO

complesse e articolate. Le differenti dimensioni dei grani, sono legate ai profili di temperatura che si vengono a creare; in particolare sul fondo del pezzo saldato il picco di temperatura è più basso rispetto a quello della parte superiore, in quanto non coinvolto direttamente dalla spalla dell'utensile, oltre ad essere a contatto meccanico e termico diretto con il piano di sostegno. Questo contatto permette alla superficie inferiore del pezzo di dissipare parte del calore, si hanno quindi temperature più basse e tempi di escursione più brevi. La combinazione di questi due fattori porta a un riduzione nell'accrescimento dei grani. Il comportamento del materiale appare maggiormente influenzato dalla velocità di traslazione dell'utensile, piuttosto che dalle variazioni di velocità di rotazione. Correlando i dati ottenuti con quelli relativi alle prove di trazione su provini saldati con la medesima tecnologia si deduce facilmente che l'analisi di durezza fornisce un parametro relazionabile al carico di rottura del materiale. È importante sottolineare che la rottura sia avvenuta sempre in corrispondenza della zona termicamente alterata (HAZ), confermando quindi questa regione come la più debole dell'intera saldatura. Questo permette infine di correlare le caratteristiche metallurgiche di tale zona con la resistenza meccanica delle saldature. Secondo questa correlazione la resistenza a trazione cresce al diminuire della dimensione media dei grani, mentre per la deformabilità si ha un andamento inverso. La scelta dei parametri di processo ottimali può essere pertanto effettuata sulla base di queste ultime considerazioni.

6. Conclusioni

La FSW è una tecnica innovativa di saldatura dei materiali, che presenta molti vantaggi rispetto ai metodi tradizionali di saldatura, e che oltretutto è in continua evoluzione, grazie ad innumerevoli ricerche diffuse in tutto il mondo. Forse è proprio per questo che ad oggi sono stati raggiunti ottimi risultati. Il principale vantaggio della tecnologia è la possibilità di saldare tra loro materiali difficilmente saldabili come le leghe d'alluminio 2XXX e le leghe della serie 7XXX, non raccomandate per saldature di tipo fusorio. La saldatura per fusione genera in questi materiali una zona fusa che risolidificando porta il materiale a perdere gran parte delle proprietà meccaniche. Si evitano con la tecnologia FSW le cosiddette zone fragili che derivano dalla fusione e successiva risolidificazione del materiale. Inoltre la procedura FSW porta ad un affinamento del grano derivante dall'ingente deformazione plastica e quindi mantenimento delle proprietà meccaniche, senza che vi sia sensibile peggioramento delle stesse come invece accadrebbe nel caso di saldatura per fusione. Nel presente lavoro si sono studiati gli effetti dei parametri di processo della Friction Stir Welding (FSW) per giunti saldati di testa in alluminio AA6060-T6 per applicazioni nel settore ferroviario. Il principale risultato è stata la definizione di un intervallo di valori di velocità di rotazione e avanzamento utili ad ottenere una giunzione dalle buone caratteristiche meccaniche. Inoltre, è stato

- the central area (Nugget) characterized by a very fine and uniform microstructure, with mechanical characteristics superior to those of the other areas of the joint and of the mechanical characteristics of the joints obtained by fusion.

Fig. 11 shows the joint with their respective areas.

From the micrographs is observed as an increase in the number of revolutions of the tool and an increase in the feed rate result in a more intense mixing of the material, with consequent lines indicative of the flow increasingly complex and articulated. The different sizes of the grains are linked to the temperature profiles that are created, in particular on the bottom of the workpiece the peak temperature is lower than that of the upper part, as not involved directly in the shoulder of the tool, in addition to be in contact on support plan. This contact allows the lower surface of the workpiece to dissipate some of the heat, will thus have lower temperatures and shorter times of excursion. The combination of these two factors leads to a delay in growth of the grains. The behavior of the material appears to be more influenced by the travel speed of the tool, rather than by changes in the speed of rotation. Correlating the data obtained with those relating to tensile tests on specimens welded using the same technology can be deduced easily that the analysis of hardness provides a parameter applicable to the breaking load of the material. It is important to emphasize that the breakage always occurred at the heat affected zone (HAZ), thus confirming this region as the weakest of the entire welding. This finally allows correlating the metallurgical characteristics of that area with the mechanical strength of the welds. According to this correlation the tensile strength increases with decreasing average grain size, while for the deformability, has a reverse trend. The choice of the optimal process parameters can be performed based on these considerations.

6. Conclusion

The FSW is an innovative technique of welding materials, which has many advantages over traditional methods of welding, and is constantly evolving, thanks to research in different countries in the world. Perhaps, for this reason they are been achieved very good results. The main advantage of this technology is the ability to weld difficult materials such as aluminum alloys 2XXX and 7XXX series alloys, not recommended for welding with melting. The fusion welding generates in these materials a melted area that solidifying bring the material to lose a large part of the mechanical properties. With the Friction Stir Welding, the so-called weak areas resulting from the melting and subsequent solidification of the material, there is not present in this case. Furthermore, the procedure FSW leads to a grain refinement arising by the huge plastic deformation and then maintenance of the mechanical properties, without there being any significant deterioration of the same, as it would happen in the case of fusion welding. In the present work, it is been studied the effect of process parameters of the Friction Stir Welding (FSW) for welded joints of AA6060-T6 aluminum head for applications in the railway

OSSERVATORIO

messo in luce come sia la velocità di rotazione che quella di avanzamento possano influenzare in modo significativo la resistenza delle giunzioni. Quello che si evince in questo studio che è possibile ottenere una buona saldatura FSW operando all'interno di un range di parametri di processo piuttosto ampio. Le giunzioni sono state caratterizzate mediante microscopia ottica ed è stato rilevato un forte effetto di ricristallizzazione della struttura come conseguenza del processo studiato e dei parametri di processo applicati. L'intensa deformazione plastica e le alte temperature raggiunte durante il processo di saldatura, comportano un'evoluzione micro strutturale del materiale nella zona di giunzione, per cui si verificano nel materiale fenomeni di ricristallizzazione e lo sviluppo di una nuova microstruttura. La dimensione dei grani ricristallizzati nelle giunzioni esaminate risulta essere dipendente dai parametri di processo, in particolare dal rapporto tra la velocità di rotazione dell'utensile e la velocità di traslazione.

sector. The main result has been the definition of a range of values of speed of rotation and feed useful to obtain a joint with good mechanical characteristics. Furthermore, it is been highlighted as both the rotational speed that the feed can significantly influence the resistance of the junctions. That is apparent in the study that it is possible to obtain a good welding FSW operand within a range of process parameters rather wide. The junctions are characterized by optical microscopy and was found a strong effect of recrystallization of the structure because of the process studied and the process parameters applied. The intense plastic deformation and the high temperatures reached during the welding process, involving micro structural evolution of the material in the junction area, for which they occur in the material phenomena of recrystallization and the development of a new microstructure. The size of recrystallized grains in the joints examined appears to be dependent on the process parameters, in particular the ratio between the speed of rotation of the tool and the speed of translation.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] BULL M., "Aluminium sheet alloys for structural and skin applications", SAE Technical Paper Series 920669, 1992.
- [2] HURD T.J., BURGER A., KOOIJ N.D.A., VIEREGGE K., HASZLER A., "New alloy development in aluminium brazing sheet", in: Proc. Of ICAA-6, Toyohashi, Japan, 1998, pp. 1979-1984.
- [3] KAWASAKI T., OKUNO S., MASAI K., YAMAZI K., OHTA T., IKEDA R. and HASEGAWA S., "Structural analysis of railway car body mae of aluminum holloe extrusions", 1998, Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., (in Japanese), vol. 65(636), pp. 184-190.
- [4] THOMAS W.M., NICHOLAS E.D., NEEDAM J.C., MURCH M.G., TEMPLESMITH P., DAWES C.J., GB Patent Application No. 9125978.8, December 1991 and US Patent No. 5460317, October 1995.
- [5] KAWASAKI T., MAKINO T., MASAI K., OHBA H., INA Y., EZUMO M., "Application of Friction Stir Welding to Construction of Railway Vehicles", 2004, JSME International Journal, vol. 47(3), pp. 502-5010.
- [6] D'URSO G., LONGO M., GIARDINI C., "Characterization of friction stir welded tubes by means of tube bulge test", 2011, AIP Conference Proceedings vol. 1353, pp. 1259-1264.
- [7] LAKSHMINARAYANAN A.K., BALASUBRAMANIAN V., "Process parameters optimization for friction stir welding of RDE-40 aluminium alloy using Taguchi technique", Trans. Nonferrous Met. Soc. China 18:548-554, 2008.
- [8] D'URSO G., LONGO M., GIARDINI C., "Mechanical and metallurgical analyses of longitudinally friction stir welded tubes: the effect of process parameters", 2013, International Journal of Materials and Product Technology 46 (2-3), pp. 177-196.
- [9] DUBOURG L., GAGNON F.O., NADEAU F., ST- GEORGES L., JAHAZI M., "Process window optimization for FSW of thin and thick sheet al alloys using statistical methods", In 6th Int. Symp. on FSW, 2006.
- [10] LIU F.C., XIAO B.L., WANG K. et al., "Investigation of superplasticity in friction stir processed 2219Al alloy", 2010, Mater Sci and Eng A, vol. 527, pp. 4191-4196.
- [11] LIGUO Z., SHUDE J., GUOHONG L., CHUNLIN D., LI F.. "Friction stir welding of Al thin plate by rotational tool without pin", 2011, J. Mater Sci. Technol, vol. 27(7), pp. 647-652.
- [12] BRENNA M., FOIADELLI F., TIRONI E., ZANINELLI D., "Ultracapacitors application for energy saving in subway transportation systems", 2007 IEEE International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07, pp 69-73.
- [13] Norma per prove di Trazione: UNI EN 10002-1:2004.
- [14] Norma per le prove di Microdurezza: UNI EN ISO 14577-1:2004.
- [15] D'URSO G., LONGO M., GIARDINI C., "Microstructural analysis of AA6060-T6 friction stir welded joints: Correlation between process parameters grain size", 2013, Metallurgia Italiana vol. 105(6), pp. 23-30.